

环保型充气柜关键技术及具体运用

王茂玉 张 磊 曹龙伟 马千里 侯小默

摘要: 随着全球环保意识的增强,传统以六氟化硫(SF₆)为绝缘介质的充气柜因其对环境的不利影响而逐渐受到关注。为了减少SF₆的使用,研发环保型充气柜成为电力行业的重点研究方向。本文深入探讨了环保型充气柜的关键技术,尤其是替代绝缘气体的选择、绝缘件材料的改进及其在实际应用中的表现,希望对相关从业人员提供参考。

引言

在电力需求不断增长、电网规模不断扩大的情况下,电力设备对环境的影响受到人们的普遍重视。传统的充气柜中所使用的六氟化硫(SF₆)是一种具有极高温室效应的气体,其全球变暖的可能性是二氧化碳的几千倍。SF₆虽然在电气绝缘方面表现突出,但是它可能带来的环境危害使寻求环保替代品十分必要。

近年来国际电力行业及科研机构在发展低GWP绝缘气体,优化装置结构设计及提高系统运行效率上进行了广泛研究。环保型充气柜正是在这种情况下应运而生,通过采用空气、氮气、二氧化碳等环保替代气体或者混合气体并与先进设计技术相结合而产生,不但使SF₆用量大幅度降低,而且使装置环保性能得到改善。与此同时,在智能电网蓬勃发展的今天,环保型充气柜已经在远程监控、故障检测以及预测维护领域显示出了广泛的应用前景。

作者简介:

- 1.王茂玉(1987.10——)男,汉族,本科学历,中级工程师,主要从事电力系统配电网开关设备方面的研究工作。
- 2.张磊(1982.05——)男,汉族,本科学历,中级工程师,主要从事机械方面的研究工作。
- 3.曹龙伟(1987.01——)男,汉族,本科学历,工程师,主要从事配电网开关设备制造方面的管理工作。
- 4.马千里(1988.12——)男,汉族,本科学历,工程师,主要从事高压开关相关装配和制造工艺研究方面的工作。
- 5.侯小默(1987.05——)女,汉族,硕士研究生,副高级工程师,主要从事配电网开关机械设计相关的研究工作。

一、环保型充气柜概述

环保型充气柜是电力行业为了迎接环境挑战而提出的一种创新性产品,逐渐成为取代传统SF₆充气柜最主要的选择。该类柜体摒弃温室效应显著,不易自然分解的绝缘介质SF₆,改用例如干燥空气和氮气等环保气体,使其在保证电气绝缘性能前提下,显著减少对周围环境的不利影响。环保型充气柜设计充分考虑绝缘气体环保特性和电气性能平衡问题,经过精密计算和实验验证保证替代气体的气密性和绝缘强度、灭弧能力等等,都能够达到电网运行高标准。其壳体通常由优质不锈钢材料制作而成,配合先进激光切割及焊接技术保证柜体结构强度和气密性,防护等级可达到IP67级,有效抵抗恶劣环境条件的影响。另外,该环保型充气柜将模块化设计理念融入其中,易于灵活配置和拓展,以适应各种应用场景下的特定要求。这些特性共同组成环保型充气柜最核心的优点,对电力行业绿色可持续发展起到强大的支持作用。



图1 环保型充气柜

二、环保型充气柜关键技术

1.替代绝缘气体的选择关键

替代绝缘气体的选择在环保型充气柜的研究中占据重要地位。传统的六氟化硫(SF₆)气体因其优异的绝缘性能和电弧熄灭能力,广泛应用于电力设备中。然而,

SF₆的全球变暖潜值(GWP)高达23,500,是二氧化碳的数千倍,具有严重的环境影响,因此寻找低GWP、性能稳定且安全的替代气体成为研究热点。目前,主要替代气体包括空气、氮气(N₂)、四氟化碳(CF₄)、氟化氮(NF₃)、六氟乙烷(C₂F₆)、三氟化氮(NF₃)、二氧化碳(CO₂)和氟代酮类化合物等。

表1中列出了几种替代气体的关键参数,包括相对介电常数、绝缘强度、GWP值、毒性、可燃性等。氟代酮类化合物由于其较低的GWP值(约为1),在环境保护方面具有显著优势,并且其介电常数接近SF₆,为2.0-2.5。然而,氟代酮的分解产物具有一定的毒性,需要在密闭系统中使用以避免泄漏对环境和人体造成危害。空气和氮气虽然无毒且GWP为0,但其绝缘强度仅为SF₆的40%-50%,难以在高电压应用中完全取代SF₆。混合气体,如CO₂与氟代酮的混合物,通过调整成分比例,可以在兼顾环保性的同时提高绝缘性能,这种混合气体的GWP通常可控制在50以下,同时保持80%以上的SF₆绝缘性能。

此外,新型气体在实践中的性能,需综合考虑各种环境条件的稳定性和寿命问题。研究显示,某些替代气体在高温或者强电场的环境中可能被分解而影响长期运行的稳定性以及设备的安全性。所以选择替代气体既要满足绝缘性能的基本要求,又要考虑环保性,安全性和在具体应用环境下的稳定性等。这些技术参数与实际性能一起,确定环保型充气柜备选气体的终极选择。

表1 相关替代气体参数

气体类型	介电常数(ε _r)	绝缘强度(相对SF ₆)	GWP值	毒性	可燃性
SF ₆	9.3	1.0	23,500	低	否
空气	1.0	0.4-0.5	0	否	否
氮气	1.0	0.4-0.5	0	否	否
CO ₂	1.6	0.5-0.7	1	低	否
氟代酮	2.0-2.5	0.8-0.9	1	中	否
CF ₄	1.9	0.7-0.8	7,390	低	否
C ₂ F ₆	2.2	0.7-0.8	12,200	低	否
NF ₃	1.6	0.6-0.7	17,200	高	否

2. 绝缘件材料的改进

提高绝缘件材料是环保型充气柜技术进步的又一主要方面,它的性能好坏直接关系到设备绝缘强度,耐久性及对环境适应性等。传统绝缘材料有环氧树脂,玻璃纤维以及陶瓷,它们虽绝缘性能良好,但是长时间工作易受环境因素影响,例如温度的变化,湿度的升高以及

污染物的侵蚀等,这些都会使材料老化,绝缘性能降低。近年来随着人们对环保要求不断提高以及新材料技术不断开发,新型绝缘材料研究也逐渐成为人们关注的重点。

纳米复合材料通过在基体材料中引入纳米级填料,如纳米二氧化硅(SiO₂)、纳米氧化铝(Al₂O₃)和碳纳米管等,显著提升了材料的介电强度和热稳定性。研究表明,加入5wt%纳米SiO₂的环氧树脂,其介电强度可提高15%-20%,热变形温度提高了10℃,同时材料的体积电阻率达到10¹⁶Ω·cm,远超传统环氧树脂的10¹²Ω·cm。碳纳米管的加入还可以提高材料的导热性能,使得材料在高负载条件下能够有效散热,减少局部过热风险,延长设备使用寿命。

氟塑料(如聚四氟乙烯,PTFE)因其优异的耐化学腐蚀性和高温稳定性,被广泛应用于特殊环境中的绝缘件。PTFE材料在200℃下的介电常数为2.1,几乎不受温度变化影响,其击穿电压可达60kV/mm。此外,氟塑料材料的吸水率极低,仅为0.01%,在高湿度环境下能够保持稳定的绝缘性能,适用于沿海或高湿度地区的电力设备。

同时,新型聚合物基材料如聚醚醚酮(PEEK)和液晶聚合物(LCP)等也因其机械强度高、耐高温好而备受关注。PEEK材料的介电强度在150℃时可维持在20kV/mm,远高于传统绝缘材料的10-15kV/mm。此外,PEEK材料的耐磨性和抗老化性能优异,适合在高机械应力和长期运行的环境中使用。

绝缘件材料的改进不仅关注绝缘性能的提升,还需考虑材料的环保性和可回收性。研究表明,纳米复合材料和新型聚合物材料在兼顾性能提升的同时,也展现出较好的环境友好性和资源循环利用潜力。

表2 相关绝缘材料参数

材料类型	介电强度(kV/mm)	介电常数(ε _r)	热变形温度(℃)	体积电阻率(Ω·cm)	吸水率(%)	环境适应性
环氧树脂	15-25	3.6-4.0	90-120	10 ¹²	0.1-0.2	中
纳米复合环氧树脂	20-30	3.8-4.2	130-150	10 ¹⁶	0.05-0.1	高
PTFE(聚四氟乙烯)	60	2.1	>200	10 ¹⁸	0.01	高
PEEK	20	3.3	150	10 ¹⁵	0.05	高
陶瓷	40-70	6.0-8.0	>300	10 ¹⁴	0	高

3. 环保型充气柜的结构设计优化

环保型充气柜结构设计优化对提高整体性能及环保性具有关键性作用。传统充气柜设计以追求高电气绝缘

性能及结构强度为主，而环保型充气柜设计思路更加注重材料减量化，模块化结构及装置紧凑性。引入紧凑型设计后，可有效地减小设备体积及材料用量，这样既可降低生产成本，又可降低设备运输及安装中碳排放。

结构设计上，通过模块化设计，使各构件能够自主制造与维修，减少个别构件失效造成系统整体停运的危险，增强充气柜运行可靠性与效率。为提高环保性，多采用可回收材料与无毒涂层相结合的方式，保证了设备生命周期末期的安全处理与重复使用。合理地进行通风及散热设计同样是优化中的一个重要组成部分，通过对气流路径及散热材料进行优化，使装置在负载较大时仍能稳定工作，提高其使用寿命。这些结构设计优化措施对环保型充气柜广泛应用于现代电力系统打下坚实基础。

三、环保型充气柜的具体运用分析

1. 电力系统中的应用现状

在现代电力系统中，环保型充气柜的应用越来越广泛，特别是在城市配电网和工业电力设施中。以ABB的ZX2 AirPlus和施耐德电气的SM6 Air作为代表，这些产品采用了低全球变暖潜值（GWP）气体代替传统的六氟化硫（SF₆），如ABB ZX2 AirPlus使用的是基于氟化酮的混合气体，这种气体的GWP仅为1，大幅减少了温室气体的排放。此类充气柜通常用于中压配电系统，额定电压可达到36kV，能够满足高密度城市区域的配电需求，设备体积紧凑，便于在狭小空间内安装，具有较高的可靠性和操作便捷性。

2. 恶劣环境下的表现

环保型充气柜在严酷的环境条件中稳定性与耐久性也被证明是如此。就施耐德电气GHA充气柜而言，这款产品之所以能在高海拔地区，极寒高湿环境中表现优异，是因为它使用了环保绝缘气体以及高耐候性材料。GHA充气柜防护等级达IP65，可有效抵抗灰尘，湿气及腐蚀性气体，适合沿海地区及化工厂等复杂环境。产品额定电压可达到40.5kV，极寒（-25℃）环境中仍能稳定运行，确保关键电力设备连续运转。

3. 运维与管理策略的改进

运维管理中环保型充气柜智能化、数字化技术的运用逐渐普及。以ABB公司ZX0.2 AirPlus充气柜为例，该充气柜安装有智能监测系统可对设备运行状况进行实时监控，对可能出现的故障进行报警，减少维护成本，提高设备可靠性。通过远程监控和数据分析，运维团队能够在问题发生之前实施预防性维护以缩短停机时间并保证供电系统稳定运行。这款产品采用了模块化的设计理念，使得维护工作变得更为简便，与传统的充气柜相比，组件的替换时间减少了超过30%，从而提升了整体设备的工作效率。

结束语

环保型充气柜在现代电力设备中占据着举足轻重的地位，这既反映出电力行业对于环境保护的重视，又显示出技术创新在产业发展中的动力作用。通过选用替代绝缘气体，改进绝缘件材料及优化结构设计等措施，环保型充气柜的性能，安全性及环保性均有明显进步。这几项技术的集成及应用保证了环保型充气柜在各种环境及应用场景下都能稳定工作，符合现代电力系统及工业领域对于可靠性及环保性两方面的要求。

参考文献

- [1] 陈利民, 张罗锐, 李红雷, 等. 环保型充气柜关键技术及应用[J]. 中国科技成果, 2022, 23(14): 29-31.
- [2] 陈利民, 张罗锐, 李红雷, 等. 40.5 kV环保型充气柜三工位开关绝缘结构优化设计[J]. 科学技术创新, 2022(029): 000.
- [3] 李敏, 王军委, 王峰. 一种装有磁控开关的充气柜研究[J]. 电工技术, 2022(5): 2.
- [4] 李勇, 蔡尔何, 辛道越, 等. 66 kV充气柜母线电气联接系统设计[J]. 机电工程技术, 2022(009): 051.
- [5] 钱卫华, 金静, 王健. 一种高安全型及高环保型充气柜. CN202220737082.8[2024-04-22].